

Rec'd PCT/PTO 24 JUN 2005

PCT/JP03/16725

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

25.12.03

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日
Date of Application: 2003年11月 5日

出願番号
Application Number: 特願2003-375986

[ST. 10/C]: [JP 2003-375986]

出願人
Applicant(s): 日本電信電話株式会社

REC'D 19 FEB 2004

WIPO

PCT

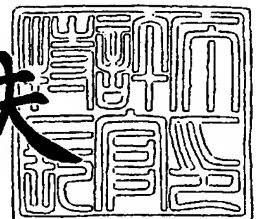
PRIORITY
DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

2004年 2月 6日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



出証番号 出証特2004-3007319

【書類名】 特許願
【整理番号】 NT 55786
【提出日】 平成15年11月 5日
【あて先】 特許庁長官 殿
【国際特許分類】 G02B 6/12
G02B 6/10
G02B 6/42

【発明者】
【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
【氏名】 鬼頭 勤

【発明者】
【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
【氏名】 高橋 浩

【発明者】
【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
【氏名】 橋本 俊和

【発明者】
【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
【氏名】 北川 毅

【発明者】
【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
【氏名】 小川 育生

【発明者】
【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
【氏名】 大山 貴晴

【特許出願人】
【識別番号】 000004226
【氏名又は名称】 日本電信電話株式会社

【代理人】
【識別番号】 100077481
【弁理士】
【氏名又は名称】 谷 義一

【選任した代理人】
【識別番号】 100088915
【弁理士】
【氏名又は名称】 阿部 和夫

【先の出願に基づく優先権主張】
【出願番号】 特願2002-378514
【出願日】 平成14年12月26日

【手数料の表示】
【予納台帳番号】 013424
【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】
【物件名】 特許請求の範囲 1
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1
【包括委任状番号】 9701393

【書類名】特許請求の範囲

【請求項 1】

平面基板上に、入力導波路と第 1 のスラブ導波路とアレイ導波路と第 2 のスラブ導波路と出力導波路とが順次接続されており、

前記入力導波路と前記第 1 のスラブ導波路との接続領域には、当該入力導波路の屈折率に比較して高屈折率の散乱点が複数配置されて設けられていることを特徴とするアレイ導波路格子型光合分波回路。

【請求項 2】

前記散乱点は、前記入力導波路の出力端に形成される光フィールド分布の等位相面に歪がなく且つ振幅にダブルピークを有するように配置されていることを特徴とする請求項 1 に記載のアレイ導波路格子型光合分波回路。

【請求項 3】

前記散乱点の前記入力導波路内での 2 次元的な配置分布は、前記光の伝搬方向に伸びる直線に対して概ね線対称であることを特徴とする請求項 1 に記載のアレイ導波路格子型光合分波回路。

【請求項 4】

前記散乱点の 1 辺の長さは、 $0.2\ \mu\text{m}$ 以上であることを特徴とする請求項 1 乃至 3 の何れかに記載のアレイ導波路格子型光合分波回路。

【請求項 5】

前記平面基板はシリコン基板であり、前記光導波路は石英系ガラス光導波路であることを特徴とする請求項 1 乃至 4 の何れかに記載のアレイ導波路格子型光合分波回路。

【書類名】明細書

【発明の名称】アレイ導波路格子型光合分波回路

【技術分野】

【0001】

本発明は、アレイ導波路格子型光合分波回路に関し、より詳細には、波長分散が小さいアレイ導波路格子型光合分波回路に関する。

【背景技術】

【0002】

現在、通信容量の拡大のために複数の光波長を用いた光波長多重通信システムの開発が盛んに行われている。この光波長多重通信システムにおいて、複数の波長の光信号を送信機側で合波したり、1本の光ファイバ中を伝搬する複数の光信号を受信機側で異なるポートに分波するための光波長合分波回路として、アレイ導波路回折格子型光合分波回路が広く用いられている。

【0003】

図1は、従来のアレイ導波路回折格子型光合分波回路の構成例を説明するための図である（例えば、非特許文献1参照）。この回路は、基板100上に設けられた、入力導波路101と第1のスラブ導波路102とアレイ導波路103と第2のスラブ導波路104と出力導波路105とが順次接続されて構成されている。

【0004】

入力導波路101から入力された光は第1のスラブ導波路102により拡げられ、各波長に対応する導波路で構成されたアレイ導波路103へと分波される。そして、第2のスラブ導波路104で再び合波されて出力導波路105へと導かれる。ここで、第1のスラブ導波路102のアレイ導波路103側の端部に投射された光フィールドパターンは、基本的には、第2のスラブ導波路104のアレイ導波路103側の端部に再生（コピー）されることになるが、アレイ導波路103は、互いに隣り合う光導波路の光路長がちょうど ΔL だけ異なるように設計されているため、光フィールドは、入力された光の波長に依存して傾きをもつこととなる。この傾きにより、第2のスラブ導波路104の出力導波路105側の端部で光フィールドが焦点を結ぶ位置が波長ごとに変化し、これにより波長分波が可能となる。

【0005】

このようなアレイ導波路格子型光合分波回路は、複数の波長の光信号を1本の光ファイバ中で伝送させる光多重通信システムにおいて必要不可欠な光部品となりつつある。また、図1に示したアレイ導波路格子型光合分波回路の透過波長帯域幅を拡げたパスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路の提案も種々行われている。

【0006】

図2は、従来提案されているパスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路の構成例を説明するための図である（例えば、非特許文献2参照）。

【0007】

この回路は、図2（a）に示すように、図1に示した回路において、入力導波路101と第1のスラブ導波路102との間に、図2（b）に示した形状のパラボラ導波路106を設けて構成される回路である。なお、図中の z は、光の伝搬方向を示している。

【0008】

図3は、図2の回路構成とした場合の、パラボラ導波路106のスラブ導波路102との接続面における光フィールド分布を説明するための図で、 z は光の伝搬方向、 x は z 方向と垂直な導波路の断面方向を意味している。この図に示すように、光フィールド分布はダブルピークを有する分布形状となる。第2のスラブ導波路104の出力導波路側でこのダブルピークをもつ光フィールドが再生されて出力導波路105に結合することとなるため、透過波長帯域の拡大が実現されることとなる。

【0009】

【非特許文献1】K. Okamoto, "Fundamentals of Optical Waveguides", Academic

Press (2000).

【非特許文献 2】 K. Ohtsuka and A. Sugita, "Flat spectral response arrayed-waveguide grating multiplexer with parabolic waveguide horns", Electronics Letters, Vol. 32, No. 18, pp. 1661-1662 (1996).

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

しかしながら、上述した従来構成のパスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路は、図 4 に示すように、パラボラ導波路内の位相分布に起因する大きな波長分散値を有する。波長分散は信号スペクトル成分に異なる遅延時間を与えるため、大きな波長分散を有する従来のパスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路では光パルス劣化が著しいという問題がある。

【0011】

本発明は、かかる問題に鑑みてなされたもので、その目的とするところは、波長分散の小さなアレイ導波路格子型光合分波回路を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明はかかる課題を解決するために、アレイ導波路格子型光合分波回路であって、平面基板上に、入力導波路と第 1 のスラブ導波路とアレイ導波路と第 2 のスラブ導波路と出力導波路とが順次接続されており、前記入力導波路と前記第 1 のスラブ導波路との接続領域には、当該入力導波路の屈折率に比較して高屈折率の散乱点が複数配置されて設けられていることを特徴とする。

【0013】

好ましくは、前記散乱点は、前記入力導波路の出力端に形成される光フィールド分布の等位相面に歪がなく且つ振幅にダブルピークを有するように配置されている。

【0014】

また、好ましくは、前記散乱点の前記入力導波路内での 2 次元的な配置分布は、前記光の伝搬方向に伸びる直線に対して概ね線対称である。

【0015】

また、好ましくは、前記散乱点の 1 辺の長さは、 $0.2 \mu\text{m}$ 以上である。

【0016】

さらに、好ましくは、前記平面基板はシリコン基板であり、前記光導波路は石英系ガラス光導波路である。

【発明の効果】

【0017】

本発明は、入力導波路内に空間的屈折率分布に基づく複数の散乱点を配置することにより伝搬光の位相と強度とを同時に制御することとしたので、波長分散を低減した低分散のアレイ導波路型光合分波回路の提供が可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。なお、各図面において同様の機能を有する箇所には同一の符号を付し、説明の重複は省略する。また、入力光と入力ポート、および、出力光と出力ポート、に同じ符号を用いる場合があり得る。

【0019】

(空間的屈折率分布に基づく複数の散乱点の基本概念)

本発明は、入力導波路内に空間的屈折率分布に基づく複数の散乱点を配置するものであるが、本発明のアレイ導波路型光合分波回路を説明するための前提として、かかる散乱点が如何なる空間的屈折率分布により実現されるかについての理解が必要である。従って、まず、波動を伝搬させる媒体（波動伝達媒体）の空間屈折率分布の決定方法についての一般的な説明を行う。

【0020】

以下の説明では、「屈折率」によって波動伝達媒体の性質を規定しているが、「屈折率」とはその文言の定義の通り一般的な平面状の波動の伝搬において波動を屈折させる割合（平面波の方向を偏向させる割合）を意味するものであり、光信号に対する媒体の性質を規定するものである。光信号の場合は主として誘電率である。

【0021】

なお、この波動伝達媒体は「ホログラフィック」波動伝達媒体と呼ぶことができるが、この意味は、波動伝達媒体による回路全体での大域的なレベルでのホログラフィックな制御が、局所的なホログラフィック制御とその集合（制御された多重散乱）により実現されているという点にある。より具体的には、「ホログラフィック波動伝達媒体」とは、コヒーレンスな光のパターンを入力して所望の光のパターンとして出力させるために、この媒体中を伝搬する順伝搬光と逆伝搬光の位相差が媒体中の何れの場所においても小さくなるように屈折率を配置し、局所的なレベルでのホログラフィックな制御を多重に繰り返すことにより、大域的なホログラフィック制御を実現するものである。

【0022】

図5 (a) ~ (c) は、ホログラフィック波動伝達媒体の基本概念と基本構造とを説明するための図である。まず、図面を参照して用語の説明をする。図5 (a) 中の1は光回路基板であり、1-1はホログラフィック波動伝達媒体により構成される光回路の設計領域である。光回路の一方の端面は入力光3-1が入射する入射面2-1であり、この入力光3-1はホログラフィック波動伝達媒体で構成された空間的な屈折率分布を有する光回路中を多重散乱しながら伝搬し、他方の端面である出射面2-2から出力光3-2として出力される。なお、ここでは、ホログラフィック波動伝達媒体は誘電体からなるものと仮定し、空間的な屈折率分布はこの媒体を構成している誘電体の局所的な屈折率を後述する理論に基づいて設定することにより実現されるものとする。

【0023】

入力光3-1が形成している「場」（入力フィールド）は、光回路を構成するホログラフィック波動伝達媒体の屈折率の空間的分布に応じて変調され、出力光3-2の形成する「場」（出力フィールド）に変換される。換言すれば、ホログラフィック波動伝達媒体は、その空間的な屈折率分布に応じて入力フィールドと出力フィールドとを相関づけるための（電磁）フィールド変換手段である。なお、これらの入力フィールドおよび出力フィールドに対して、光回路中での伝搬方向（図中z軸方向）に垂直な断面（図中x軸に沿う断面）における光のフィールドをその場所（x, z）における（順）伝搬像（伝搬フィールドあるいは伝搬光）と呼ぶ（図5 (b) 参照）。図5 (a) 中の座標zは光の伝搬方向の座標（z=0が入射面、z=z_eが出射面）であり、座標xは光の伝搬方向に対する横方向の座標である。

【0024】

ここで、「フィールド」とは、一般に電磁場（電磁界）あるいは電磁場のベクトルポテンシャル場と呼ばれるものを意味しており、電磁場の制御は、光回路中に設けられた空間的な屈折率分布（すなわち誘電率の分布）を考えることに相当する。誘電率はテンソルとして与えられるが、通常は偏光状態間の遷移はそれほど大きくないので、電磁場の1成分のみを対象としてスカラー波近似しても良い近似となる。そこで、本説明では電磁場を複素スカラー波として扱う。なお、光の「状態」には、エネルギー状態（波長）と偏光状態とがあるため、「フィールド」を光の状態を表現するものとして用いる場合には、光の波長と偏光状態をも包含し得ることとなる。

【0025】

また、通常、伝搬光の増幅や減衰を生じさせない光回路では、屈折率の空間的分布を決めると、焦点以外の入力光3-1の像（入力フィールド）は、出力光3-2の像（出力フィールド）に対して一意的に定まる。このような、出射面2-2側から入射面2-1側へと向かう光のフィールドを、逆伝搬像（逆伝搬フィールドあるいは逆伝搬光）と呼ぶ（図5 (c) 参照）。このような逆伝搬像は光回路中の場所ごとに定義することができる。す

なわち、光回路中での任意の場所における光のフィールドを考えた、その場所を仮想的な「入力光」の出射点として考えれば、上記と同様に出力光 3-27 像に対して、その場所での逆伝搬像を考えることができる。このように、光回路中の各場所ごとに逆伝搬像が定義できる。ここで特に、単一の光回路において、出射フィールドが入射フィールドの伝搬フィールドとなっている場合には、光回路の任意の点での伝搬フィールドと逆伝搬フィールドとは一致する。なお、フィールドは一般には対象とする空間全体の上の関数であるが、「入射フィールド」あるいは「出射フィールド」という場合は、入射面あるいは出射面におけるフィールドの断面を意味している。また、「フィールド分布」という場合でも、ある特定の断面に関して議論を行う場合にはその断面についてのフィールドの断面を意味している。

【0026】

屈折率分布の決定方法を説明するためには記号を用いるほうが見通しがよいので、各量を表すために以下のような記号を用いることとする。なお、対象とされる光（フィールド）は単一状態の光には限定されないで、複数の状態の光が重畳された光をも対象とされ得べく、個々の状態の光にインデックス j を充てて一般的に表記する。

$\psi^j(x)$: j 番目の入射フィールド（複素ベクトル値関数であり、入射面において設定する強度分布および位相の分布、ならびに、波長および偏波により規定される）。

$\phi^j(x)$: j 番目の出射フィールド（複素ベクトル値関数であり、出射面において設定する強度分布および位相分布、ならびに、波長および偏波により規定される）。

【0027】

なお、 $\psi^j(x)$ および $\phi^j(x)$ は、回路中で強度増幅や波長変換や偏波変換が行われな限り、光強度の総和は同じ（あるいは無視できる程度の損失）であり、それらの波長も偏波も同じである。したがって、

$\{\psi^j(x), \phi^j(x)\}$: 入出力ペア（入出力のフィールドの組み）

は、入射面および出射面における、強度分布および位相分布ならびに波長および偏波により規定される。

$\{n_q\}$: 屈折率分布（光回路設計領域全体の値の組）。

【0028】

与えられた入射フィールドおよび出射フィールドに対して屈折率分布をひとつ与えたときに光のフィールドが決まるので、 q 番目の繰り返し演算で与えられる屈折率分布全体に対するフィールドを考える必要がある。そこで、 (x, z) を不定変数として屈折率分布全体を $n_q(x, z)$ と表しても良いが、場所 (x, z) における屈折率の値 $n_q(x, z)$ と区別するために、屈折率分布全体に対しては $\{n_q\}$ と表す。

【0029】

n_{core} : 光導波路におけるコア部分のような、周囲の屈折率に対して高い屈折率の値を示す記号。

n_{clad} : 光導波路におけるクラッド部分のような、 n_{core} に対して低い屈折率の値を示す記号。

$\psi^j(z, x, \{n_q\})$: j 番目の入射フィールド $\psi^j(x)$ を屈折率分布 $\{n_q\}$ 中を z まで伝搬させたときの、場所 (z, x) におけるフィールドの値。

$\phi^j(z, x, \{n_q\})$: j 番目の出射フィールド $\phi^j(x)$ を屈折率分布 $\{n_q\}$ 中を z まで逆伝搬させたときの、場所 (z, x) におけるフィールドの値。

【0030】

以下に説明する屈折率分布の決定方法は、すべての j について $\psi^j(z_e, x, \{n_q\}) = \phi^j(x)$ あるいはそれに近い状態となるように $\{n_q\}$ を求める方法を与えるものである。

【0031】

「入力ポート」および「出力ポート」とは、入射端面および出射端面におけるフィールドの集中した「領域」で、たとえば、その部分に光ファイバを接続することにより、光強度をファイバに伝搬できるような領域である。ここで、フィールドの強度分布および位相分布は j 番目のものと k 番目のものとで異なるように設計可能であるので、入射端面およ

び出射端面に複数のポートを設けることが可能である。さらに、入射フィールドと出射フィールドの組を考えた場合、その間の伝搬により発生する位相が、元の周波数によって異なるので、周波数が異なる光（すなわち波長の異なる光）については、位相を含めたフィールド形状が同じであるか直交しているかの如何にかかわらず、異なるポートとして設定することが可能である。符号としては、入射ポート側にはアルファベットの大文字 A、B、C、・・・を充て、出射ポート側にはアルファベットの小文字 a、b、c、・・・を充てるものとする。

【0032】

その他、 α 、 γ 、 g や w は数値計算上の適当な係数であり、それらの程度については適宜文章中に示すこととするが、たとえば、通常の数値流体力学等で用いられる「スキームの安定性の議論」にしたがって、実際の数値計算では僅かに調整されるべきものである。

【0033】

伝搬方向は z 、伝搬方向に対して垂直な方向は x で表し、入射面 2-1 での z の値を 0、出射面 2-2 での z の値を z_e とする。後述するように、対象とする区別可能な光の状態に順次番号をつける。このとき、 j 番目の入射フィールドと、それに対応し出射させたい所望の出射フィールドをそれぞれ $\psi^j(x)$ および $\phi^j(x)$ とする。ここで、電磁界は実数ベクトル値の場で、かつ波長と偏光状態をパラメータとしてもつものとするが、その成分の値を一般的な数学的取扱いが容易な複素数で表示して電磁波の解を表記する。また、以下の計算においては、フィールド全体の強度は 1 に規格化されているものとする。なお、 j 番目の入射フィールドや出射フィールドとは、フィールドの強度分布と位相分布あるいは波長や偏光により互いに区別される属性を有する光の組の要素に対して適当に順番をつけたものである。

【0034】

図 5 (b) および図 5 (c) に示すように、 j 番目の入射フィールド $\psi^j(x)$ および出力フィールド $\phi^j(x)$ に対し、伝搬フィールドと逆伝搬フィールドをそれぞれ場所の複素ベクトル値関数として、 $\psi^j(z, x, \{n\})$ および $\phi^j(z, x, \{n\})$ と表記する。これらの関数の値は屈折率分布 $\{n\}$ により変化するため、屈折率分布 $\{n\}$ がパラメータとなる。記号の定義により、 $\psi^j(x) = \psi^j(0, x, \{n\})$ 、および、 $\phi^j(x) = \phi^j(z_e, x, \{n\})$ となる。これらの関数の値は、入射フィールド $\psi^j(x)$ と出射フィールド $\phi^j(x)$ および屈折率分布 $\{n\}$ が与えられれば、ビーム伝搬法などの公知の手法により容易に計算することができる。これらの各フィールドの様子をより具体的な例を用いて説明すると以下ようになる。

【0035】

図 6 は、従来のアレイ導波路格子回路の構成例を説明するための図で、光回路設計領域 1-1 には、2つのスターカップラ（光合分波器）4-1 および 4-2 間に設けられたアレイ導波路 5 と、このアレイ導波路 5 の中央部に設けられた波長板 6 とが形成されている。この図に示したような波長多重通信における $1 \times N$ 波長分波器（ N は波長の数）を考えると、たとえば、1つの入力ポート 3-1 に対して、ほぼ同様なフィールド強度と位相分布をもつ入射フィールドで、波長 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ の異なる N 個の信号に番号をつけ、その j 番目の波長の光を所望の個別の出力ポート 3-2 から出力させる。このとき、光を分波するためには、導波路の出射面の断面における j 番目の波長の光の強度および位相の分布は、独立な出射フィールドパターンとなっていることが求められ、これを j 番目の出射フィールドと呼ぶ。分波された光を光ファイバへ出力させる場合を想定すれば、出力されるべきフィールドパターンは、独立した各々の出射フィールドが空間的に異なる場所となるフィールドの組となる。なお、与えられた入射フィールドの組を所望の出射フィールドで出力する光回路を構成するためには、入射フィールドあるいは出射フィールドのパターンは、その強度および位相の分布が j 番目と k 番目とで同一であってもよい。

【0036】

以下に、空間的な屈折率分布を決定するための一般的なアルゴリズムを説明する。

図 7 はホログラフィック波動伝達媒体の空間的な屈折率分布を決定するための計算手順を説明するためのフローチャートである。この計算は繰り返し実行されるものである。

、繰り返し回数を q で表し、 $(q-1)$ 番目まで計算が実行されて、 q 番目の計算の様子が図示されている。

【0037】

$(q-1)$ 番目の計算によって得られた屈折率分布 $\{n_{q-1}\}$ をもとに、各 j 番目の入射フィールド $\phi^j(x)$ および出射フィールド $\phi^j(x)$ について伝搬フィールドと逆伝搬フィールドとを数値計算により求め、その結果を各々、 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ および $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ と表記する (ステップ S220)。

【0038】

これらの結果をもとに、各場所 (z, x) における屈折率 $n_q(z, x)$ を、次式により求める (ステップ S240)。

$$n_q(z, x) = n_{q-1}(z, x) - \alpha \sum_j \text{Im}[\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})] \cdot \dots \quad (1)$$

ここで、右辺第2項中の記号「 \cdot 」は内積演算を意味し、 $\text{Im}[]$ は $[]$ 内のフィールド内積演算結果の虚数成分を意味する。なお、記号「 $*$ 」は複素共役である。係数 α は $n_q(z, x)$ の数分の1以下の値をさらにフィールドの組の数で割った値であり、正の小さな値である。 \sum_j はインデックス j について和をとるという意味である。

【0039】

ステップ S220 と S240 を繰り返し、伝搬フィールドの出射面における値 $\phi^j(z_e, x, \{n\})$ と出射フィールド $\phi^j(x)$ との差の絶対値が所望の誤差 d_j よりも小さくなると (ステップ S230: YES) 計算が終了する。

【0040】

上式 (1) のように屈折率 $n_q(z, x)$ を求める根拠は下記のとおりであり、屈折率分布を最急降下法により求めることに対応している。

【0041】

まず、屈折率分布 $\{n_{q-1}\}$ により入射光が伝搬したフィールド $\phi^j(z_e, x, \{n_{q-1}\})$ と、最終的に得たい出力 $\phi^j(x)$ との差が最小となるためには、残差 $R = \sum_j |\phi^j(x) - \phi^j(z_e, x, \{n_{q-1}\})|^2$ が最小となればよい。なお、 $\phi^j(x)$ などは x の関数であることを表しており、特定の x の座標を意味するわけではない。また、各ペアごとに重みをつけてもよいが簡単のため全て同じ重みで和をとることとする。

【0042】

ここでは、光のフィールドの重ね合わせが可能な範囲で考えており、フィールドの重なり積分により内積が定義される。この光フィールドの重ね合わせは有限のエネルギーをもち、かつ、取り扱われるフィールドは空間的に有限な範囲に限定される。したがって、ここでいうフィールドはヒルベルト空間を形成し、光の伝搬は以下の性質を有するユニタリ変換として定義される。

【0043】

具体的には、 z_0 から z までのユニタリ変換演算子 U として、
 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\}) = U(z, z_0, \{n_{q-1}\}) \phi^j(z_0, x, \{n_{q-1}\}) \cdot \dots \quad (2)$
 が成り立ち、ここで、反射が無視できる程度であるとする、伝搬過程の加法性から、
 $U(z, z_0, \{n_{q-1}\}) = U(z, z_1, \{n_{q-1}\}) U(z, z_0, \{n_{q-1}\}) \cdot \dots \quad (3)$
 となる。

【0044】

さらに、重なり積分により定義される内積に対してユニタリ性を有するから、
 $U(z, z_0, \{n_{q-1}\})^* U(z, z_0, \{n_{q-1}\}) = U(z, z_0, \{n_{q-1}\})^{-1} U(z, z_0, \{n_{q-1}\})$
 $= |U(z, z_0, \{n_{q-1}\})|^2 = 1 \cdot \dots \quad (4)$
 となる。ここで、 $U(z, z_0, \{n_{q-1}\})^*$ は $U(z, z_0, \{n_{q-1}\})$ の自己随伴演算子である。また、 $U(z, z_0, \{n_{q-1}\})^{-1}$ は $U(z, z_0, \{n_{q-1}\})$ の逆演算子、つまり、逆方向の伝搬を与える演算子である。

【0045】

z' と z の差 $(|z' - z|)$ が十分小さい範囲において、 $U(z', z, \{n_{q-1}\})$ はビーム伝搬法などにおける丁度1ステップ分の変換をもたらす行列であると考えればよく、適

当に伝搬方向を分割してこの演算を繰り返したものが $U(z, z_0, \{n_q\})$ などであると考えればよい。

【0046】

これらの結果を用いて残差 R を書き換えると、

$$\begin{aligned} R &= \sum_j | \phi^j(x) - U(z_e, z', \{n_{q-1}\}) U(z', 0, \{n_{q-1}\}) \phi^j(x) |^2 \\ &= \sum_j | U(z_e, z', \{n_{q-1}\}) |^2 | U(z_e, z', \{n_{q-1}\})^{-1} \phi^j(x) - U(z', 0, \{n_{q-1}\}) \phi^j(x) |^2 \\ &= \sum_j | U(z_e, z', \{n_{q-1}\})^{-1} \phi^j(x) - U(z', z, \{n_{q-1}\}) U(z, 0, \{n_{q-1}\}) \phi^j(x) |^2 \\ &= \sum_j | \phi^j(z', x, \{n_{q-1}\}) - U(z', z, \{n_{q-1}\}) \phi^j(z, x, \{n_{q-1}\}) |^2 \cdots (5) \end{aligned}$$

となる。

【0047】

$|z' - z| \rightarrow 0$ の極限においては、特定の x 座標の場所 x における $U(z', z, \{n_{q-1}\})$ の変化 ($\delta_x U(z', z, \{n_{q-1}\})$) は、同じく特定の x 座標の場所 x における $n_{q-1}(z, x)$ の変化 ($\delta_x n_{q-1}(z, x)$) と、

$$\delta_x U(z', z, \{n_{q-1}\}) = -i\kappa \delta_x n_{q-1}(z, x) \cdots (6)$$

の関係を有する。なお、 κ は概ね真空中の伝搬定数程度の値で正数の適当な係数であるが、計算上他の係数と組み合わせるためここでは詳しく議論しない。

【0048】

以上の結果より、特定の x 座標の場所 x における残差 R の変化 ($\delta_x R$) として、

$$\begin{aligned} \delta_x R &= \sum_j \{-i\kappa \delta_x n_{q-1}(z, x) \phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^* \phi^j(z, x, \{n_{q-1}\}) + c.c.\} \\ &= 2\kappa \delta_x n_{q-1}(z, x) \text{Im} \sum_j \phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^* \phi^j(z, x, \{n_{q-1}\}) \cdots (7) \end{aligned}$$

が得られる。

【0049】

ここで、

$$\delta_x n_{q-1}(z, x) = -\alpha \text{Im} \sum_j \phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^* \phi^j(z, x, \{n_{q-1}\}) \quad (\alpha > 0) \cdots (8)$$

とすれば $\delta_x R < 0$ となり、この方向に変化させていけば極小値に向かうことになる。これが上式 (1) の方向に屈折率分布を変化させる理由である。

【0050】

以上の計算では、屈折率分布の初期値 $\{n_0\}$ は適当に設定すればよいが、この初期値 $\{n_0\}$ が予想される屈折率分布に近ければ、それだけ計算の収束は早くなる (ステップ S200)。また、各 j について $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ および $\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ を計算するにあたっては、パラレルに計算が可能な計算機の場合は、 j ごと (すなわち、 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ および $\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ ごと) に計算すればよいので、クラスタシステム等を利用して計算の効率化を図ることができる (ステップ S220)。また、比較的少ないメモリで計算機が構成されている場合は、式 (1) のインデックス j についての和の部分で、各 q で適当な j を選び、その分の $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ および $\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ のみを計算して、以降の計算を繰り返すことも可能である (ステップ S220)。

【0051】

以上の演算において、 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ の値と $\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ の値とが近い場合には、式 (1) 中の $\text{Im}[\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})]$ は位相差に対応する値となり、この値を減少させることで所望の出力を得ることが可能である。

【0052】

図8は上述した計算手順の理解を容易にするために、ホログラフィック波動伝達媒体中のフィールドの様子の一例を示した図である。ホログラフィック波動伝達媒体からなる光回路設計領域 1-1 の任意の位置 (x, z) において、伝搬する光の波面に対して概ね平行でかつ概ね無視できる幅 (Δz) を持った微小領域を仮定し、この微小領域の断面を X とする。なお、ここで「概ね無視できる幅」とは、屈折率分布をもたない媒体中を光がその距離 Δz だけ伝搬したときに、伝搬光の位相がもとの波面と概ね同一であるような距離を意味している。断面 X よりも入射面 2-1 側にある光回路を A 回路、出射面 2-2 側にある光回路を B 回路とすると、断面 X は A 回路と B 回路の界面となる。

【0053】

いま、所望の各入出力の値を考慮して、各組に $j = 1$ から N と番号を付け、 j 番目の組の入射フィールド $\phi^j(x)$ と出射フィールド $\phi^j(x)$ を仮定する。A 回路に入射フィールド $\phi^j(x)$ を入力して伝搬させた場合の、界面 X における、導波光、回折光および散乱光の各々のフィールドの和はフィールド $\phi^j(z_X, x, \{n_q\})$ である。また、A 回路中を伝搬する光の位相共役光として、出射フィールド $\phi^j(x)$ を A 回路とは逆方向に B 回路中を伝搬させた導波光、回折光および散乱光の各々のフィールドの和はフィールド $\phi^j(z_X + \Delta z, x, \{n_q\})$ である。これらのフィールド $\phi^j(z_X, x, \{n_q\})$ および $\phi^j(z_X + \Delta z, x, \{n_q\})$ の位相差を、各組毎に平均（または重み付け平均）した値 P を求め、この位相差 P を、所望の屈折率の範囲において可能な限り打ち消すように界面 X 上での屈折率分布を決定する。このような屈折率分布は界面 X 毎に定まるから、界面 X の位置を z 軸上で 0（入射面）から z_e （出射面）まで変化させて演算を実行することとすれば、ホログラフィック波動伝達媒体全体の屈折率分布が定まることとなる。

【0054】

屈折率の空間的分布の決定は、ホログラフィック波動伝達媒体に 2 次元的な仮想的メッシュを定め、このメッシュによって画定される微小領域（「カラム」若しくは「ピクセル」と呼ぶ）の屈折率を各カラムごとに決定するものとも言い換えることが可能である。このような局所的な屈折率は、原理的には、その場所ごとに任意の（所望の）値とすることが可能であるが、基も単純な系は、低屈折率（ n_L ）を有するカラムと高屈折率（ n_H ）を有するカラムのみからなる系であり、これら 2 種のカラムの空間的分布により全体的な屈折率分布が決定される。この場合、媒体中の低屈折率カラムが存在する場所を高屈折率カラムの空隙として観念したり、逆に、高屈折率カラムが存在する場所を低屈折率カラムの空隙として観念したりすることが可能である。すなわち、ホログラフィック波動伝達媒体とは、均一な屈折率を有する媒体中の所望の場所（カラム）をこれとは異なる屈折率のカラムで置換したものと表現することも可能である。

【0055】

上述した屈折率分布決定のための演算内容を要約すると次のようになる。すなわち、波動をホログラフィックに伝達させ得る媒体（光の場合には誘電体）に入力ポートと出力ポートとを設け、入力ポートから入射した伝搬光のフィールド分布 1（伝搬光）と、入力ポートから入射した光信号が出力ポートから出力される際に期待される出力フィールドを出力ポート側から逆伝搬させた位相共役光のフィールド分布 2（逆伝搬光）と、を数値計算により求める。そして、これらのフィールド分布 1 および 2 をもとに、伝搬光と逆伝搬光の各点 (x, z) における位相差をなくすように、媒体中での空間的な屈折率分布を求める。なお、このような屈折率分布を得るための方法として最急降下法を採用すれば、各点の屈折率を変数として最急降下法により得られる方向に屈折率を変化させることにより、屈折率を式 (1) のように変化させることで上記 2 つのフィールド間の差を減少させることが可能となる。そして、このようなホログラフィック波動伝達媒体を、入力ポートから入射した光を所望の出力ポートに出射させる光部品に応用すれば、媒体内で生じる伝搬波同士の多重散乱による干渉現象により、実効的な光路長が長くなり、緩やかな屈折率変化（分布）でも充分に高い光信号制御性を有する光回路を構成することが可能となる。

【0056】

本発明の低分散アレイ導波路型光合分波回路は、その入力導波路と第 1 のスラブ導波路との接続領域に空間的屈折率分布に基づく散乱点を配置することにより、上述の原理に基づいて、伝搬光の位相と強度とを同時に制御するようにしているが、これにより得られる主な利点は以下のとおりである。

【0057】

図 9 は、図 2 に示した従来構成の回路に設けられているパラボラ導波路 106 内のダブルピークの光フィールド分布を説明するための図である。図 2 に示した従来構成の回路に設けられているパラボラ導波路 106 内のダブルピークのフィールド分布は、0 次モードと 2 次モードの重畳によって生じ、フィールド分布 $\Phi(x)$ は次式によって表現できる。

【0058】

【数1】

$$\begin{aligned}\Phi(x) &= a_0 \varphi_0(x) \exp(-j\beta_0 z) + a_2 \varphi_2(x) \exp(-j\beta_2 z) \\ &= \exp(-\beta_0 z) \{a_0 \varphi_0(x) + a_2 \varphi_2(x) \exp(-j\delta\beta z)\} \quad \dots (9)\end{aligned}$$

【0059】

ここで、

【0060】

【数2】

$$\delta\beta = \beta_2 - \beta_0$$

【0061】

であり、

【0062】

【数3】

$$\varphi_m(x)$$

【0063】

はm次モードのフィールド分布、 β_m はm次モードの伝搬定数、 a_m はm次モードの展開係数である。すなわち、波長分散の要因である位相分布は、パラボラ導波路内に誘起された0次モードと2次モードの位相差に起因する。

【0064】

これに対して、本発明のアレイ導波路格子型光合分波回路においては、導波モードではなく、複数の散乱点が位相と強度とを局所的に制御するため、より高い自由度で出射光の強度分布と位相分布を指定することが可能となる。したがって、入力導波路内の散乱点を最適に配置（すなわち、空間的屈折率分布を最適化）することにより、出射フィールド分布の形状を位相歪のないダブルピークとすることができ、低分散のアレイ導波路格子型光合分波回路を実現することが可能となる。なお、本発明の導波路構造は、小型化および所望の帯域設計をも可能とする。

【0065】

以下に、実施例により本発明の低分散アレイ導波路格子型光合分波回路についての具体的な説明を行う。なお、以下の実施形態においては、基板にはシリコン基板を用い、その上に石英に添加物を加えて屈折率を調整した膜を堆積し、半導体作製工程で用いられる微細加工技術により、光回路をパターン化するものである。したがって、光回路パターンは2次元的であり、基板に対して水平方向に光回路としての機能を発現するようにパターン形成される。

【0066】

しかしながら、高屈折率部分と低屈折率部分とからなる回路を基板面内に2次元的に展開した場合に、単純に、低屈折率部分を光導波路のコアに相当する部分が全くないものとしてしまうと、光回路における損失が発生してしまうこととなる。したがって、光回路としては2次元的であっても基板高さ方向をも考慮して光回路が設計されるべきであることはいうまでもない。

【0067】

上述したように、本発明の光回路の作製には半導体微細加工技術が適用されるので、特に断らない限りは、光回路の屈折率分布は2値化されたパターンとなる。また、基板面内におけるパターンにおいて、屈折率が高い部分を高屈折率部、低い部分を低屈折率部と呼ぶ。

【0068】

さらに、基板水平面内のパターンについて議論する場合には、パターンの基本単位を「ピクセル」とよび、この「ピクセル」がブロック状に組み合わせられることでマクロなパタ

ーンが形成される。このようなピクセルは、最も単純な場合には、周期的に設けられたメッシュにより規定されるセルサイズの周期の格子点上に配置され、高屈折率部分と低屈折率部分とによれパターンが形成される。ただし、これらのピクセルを格子点上に配置する必要は必ずしもなく、所望の屈折率分布を得るために意図的に格子点上からずらして配置するようにしてもよい。

【実施例】

【0069】

図10は、本発明の低分散アレイ導波路格子型光合分波回路の製造プロセスを説明するための図である。先ず、シリコン基板601上に、火炎堆積法により、 SiO_2 を主体にした下部クラッドガラススート602、および、 SiO_2 に GeO_2 を添加したコアガラススート603を堆積する(図10(a))。その後、 1000°C 以上の高温で熱処理を行い、下部クラッドガラススート602およびコアガラススート603のガラス透明化を実行する。このガラス透明化熱処理により、下部クラッドガラススート602は概ね $30\mu\text{m}$ の厚みの下部クラッドガラス層604となり、コアガラススート603は概ね $7\mu\text{m}$ の厚みのコアガラス605となる(図10(b))。

【0070】

なお、図10(a)において堆積される下部クラッドガラススート602およびコアガラススート603の厚みは、図10(b)に示したガラス透明化熱処理により両層の厚みが上記厚みとなるように決定されている。

【0071】

このガラス透明化熱処理に続き、コアガラス605の上にエッチングマスク606をフォトリソグラフィ技術を用いて形成し(図10(c))、さらに、反応性イオンエッチングによりコアガラス605にパターニングを施す(図10(d))。

【0072】

パターニングされたコアガラス605上に残存しているエッチングマスク606を除去した後上部クラッドガラス607を火炎堆積法により形成し、コアガラス605を、上部クラッドガラス607と下部クラッドガラス604との間に埋め込む(図10(e))。なお、上部クラッドガラス607のガラス転移温度を低くするために、この上部クラッドガラス607には、ボロン(B)やリン(P)などのドーパントが添加されている。ガラス転移温度を低くすることにより、パターニングされたコアガラス605相互間の狭い隙間にも上部クラッドガラス607が満遍なく入り込み易くなる。

【0073】

このようにして得られたパターニングされたコアガラス605は、コアガラス605相互間に介在する上部クラッドガラス607よりも高い屈折率を有する。したがって、コアガラス605の存在領域に相当する高屈折率部と、コアガラス605相互間に介在する上部クラッドガラス607の存在領域に相当する低屈折率部とにより、2次元的な空間的屈折率分布が形成され、高屈折率部であるコアガラス605の各々は、導波光に対する散乱点として作用し、この散乱点の配置を最適化(すなわち、空間的屈折率分布を最適化)することで光フィールドの位相と強度の局所的制御が可能となる。

【0074】

図11は、パスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路のスラブ導波路に接続される入力導波路を、上述の原理に基づいて設計した構造(散乱点配置)の例を説明するための図で、図中黒部で示した領域が散乱点(高屈折率部)に対応している。この図に示すように、散乱点の入力導波路内での2次元的な配置分布は、光の伝搬方向に伸びる直線に対して概ね線対称である。

【0075】

この構造は、導波路内の散乱点を上述した最急降下法により最適配置することによって設計されたもので、この導波路は長さ $300\mu\text{m}$ 、幅 $160\mu\text{m}$ の領域を有している。この領域を 1500×800 のピクセルに分割(ピクセルの1辺の長さは $0.2\mu\text{m}$ となる)し、これらの微小領域に散乱点(低屈折率部との屈折率差 $\Delta = 0.75\%$)を最適配置

して空間的屈折率分布を形成している。なお、伝搬光を効果的に散乱させるためには、散乱点の1辺の長さを0.2 μm 以上とすることが好ましい。

【0076】

図12は、図11に示した散乱点配置を有する入力導波路から出射される光フィールドの分布（振幅および位相）の計算結果を説明するための図で、この図に示すように、等位相面に歪がなく、かつ、その振幅はダブルピーク（双峰）を有する出射光フィールド分布が得られている。

【0077】

図13は、本実施例の入力導波路を用いてチャネル間隔100GHzのアレイ導波路格子型光合分波回路を構成し、この回路のパスバンド拡大化効果と低波長分散化効果を検証した結果を説明するための図である。

【0078】

図4に示した従来構成の回路特性との比較から明らかなように、本発明の回路の波長分散は相対波長依存性をもたず透過帯域幅に殆ど影響を与えることなく低分散化が顕著であり、かつ、光損失特性も向上していることがわかる。

【0079】

これまでの説明では、散乱点として高屈折率の散乱体を用いたが、入力側スラブ導波路の端部に、高屈折率ではなく低屈折率の散乱体を配置しても同様の効果を得ることができ。また、シリコン基板上に設けられた石英系ガラス導波路によりアレイ導波路格子型光合分波回路を構成した例について示したが、導波路の構成材料はガラスに限定されるものではなく、ポリイミド、シリコン、半導体、 LiNbO_3 などの他の材料であってもよい。また、用いる基板もシリコンに限定されるものではないことはいうまでもない。

【産業上の利用可能性】

【0080】

本発明により、波長分散の小さな光合分波回路を提供することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0081】

【図1】従来のアレイ導波路回折格子型光合分波回路の構成例を説明するための図である。

【図2】従来提案されているパスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路の構成例を説明するための図である。

【図3】図2の回路構成とした場合の、パラボラ導波路のスラブ導波路との接続面における光フィールド分布を説明するための図である。

【図4】従来構成のパスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路の波長分散値を説明するための図である。

【図5】ホログラフィック波動伝達媒体の基本概念と基本構造とを説明するための図である。

【図6】従来のアレイ導波路格子回路の構成例を説明するための図である。

【図7】ホログラフィック波動伝達媒体の空間的な屈折率分布を決定するための計算手順を説明するためのフローチャートである。

【図8】計算手順の理解を容易にするために、ホログラフィック波動伝達媒体中でのフィールドの様子の一例を示した図である。

【図9】図2に示した従来構成の回路に設けられているパラボラ導波路内のダブルピークのフィールド分布を説明するための図である。

【図10】本発明の低分散アレイ導波路格子型光合分波回路の製造プロセスを説明するための図である。

【図11】パスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路のスラブ導波路に接続される入力導波路構造（散乱点配置）の例を説明するための図である。

【図12】図11に示した散乱点配置を有する入力導波路から出射される光フィールドの分布（振幅および位相）の計算結果を説明するための図である。

【図13】実施例の入力導波路を用いてチャネル間隔100GHzのアレイ導波路格子型光合分波回路を構成し、この回路のパスバンド拡大化効果と波長分散化効果を検証した結果を説明するための図である。

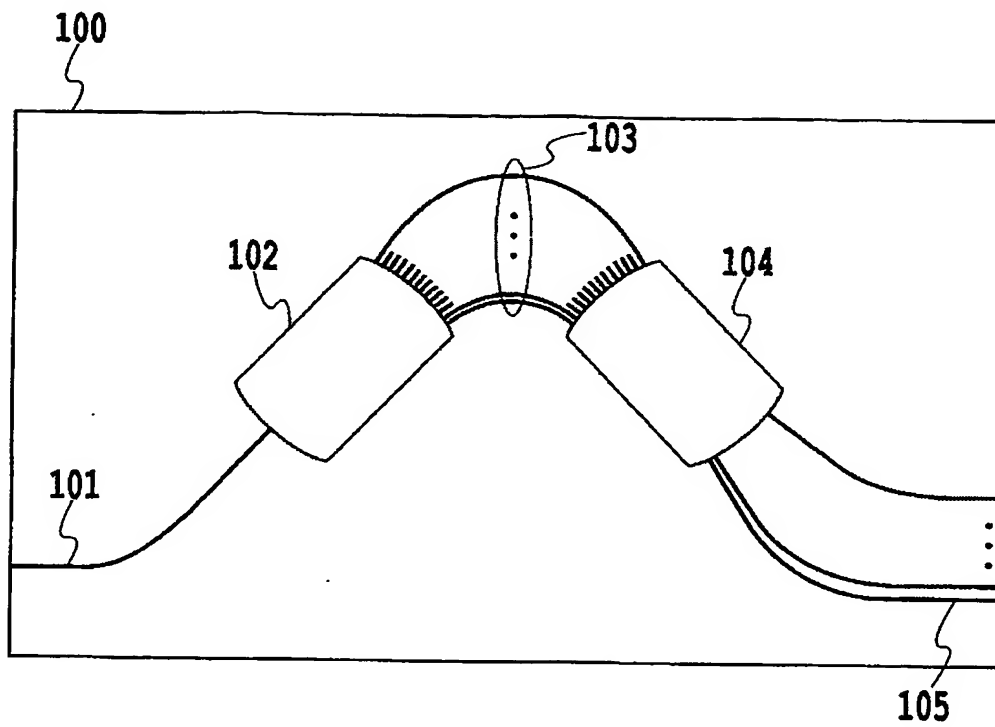
【符号の説明】

【0082】

- 1 光回路基板
 - 1-1 光回路の設計領域
 - 2-1 入射面
 - 2-2 出射面
 - 3-1 入力光
 - 3-2 出力光
 - 4-1、4-2 スターカプラ（光合分波器）
- 5 アレイ導波路
- 6 波長板
 - 100 基板
 - 101 入力導波路
 - 102 第1のスラブ導波路
 - 103 アレイ導波路
 - 104 第2のスラブ導波路
 - 105 出力導波路
 - 106 パラボラ導波路
 - 601 シリコン基板
 - 602 下部クラッドガラススート
 - 603 コアガラススート
 - 604 下部クラッドガラス層
 - 605 コアガラス
 - 606 エッチングマスク
 - 607 上部クラッドガラス

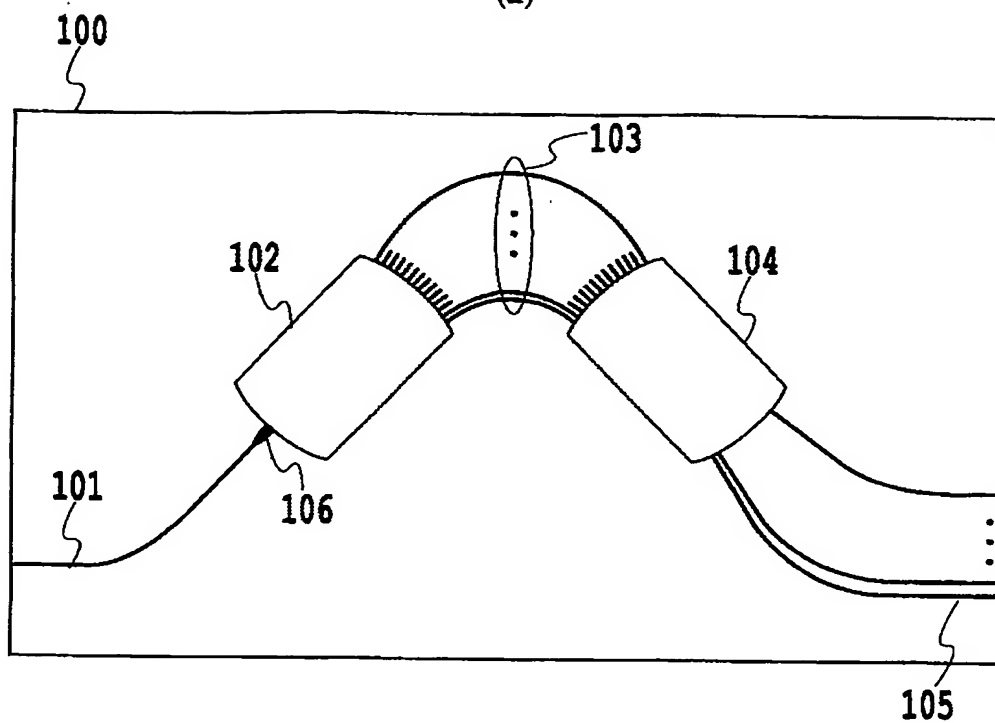
【書類名】 図面

【図 1】



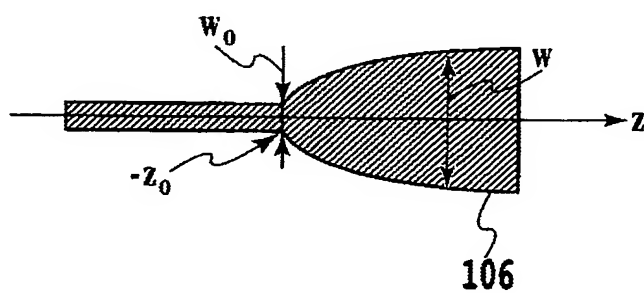
【図 2】

(a)



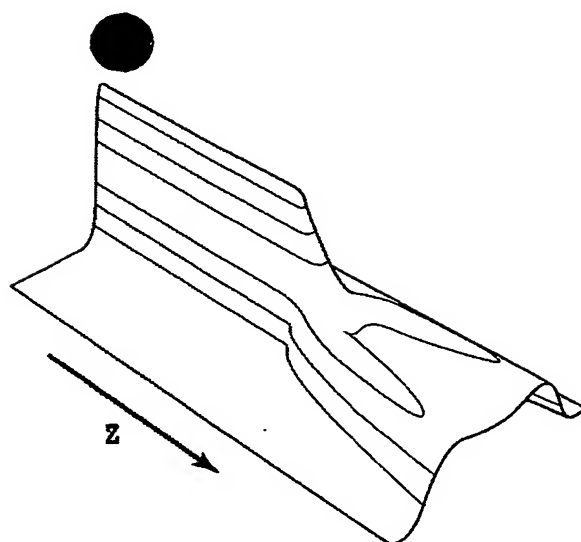
(b)

$$z = A(w^2 - w_0^2) - z_0$$

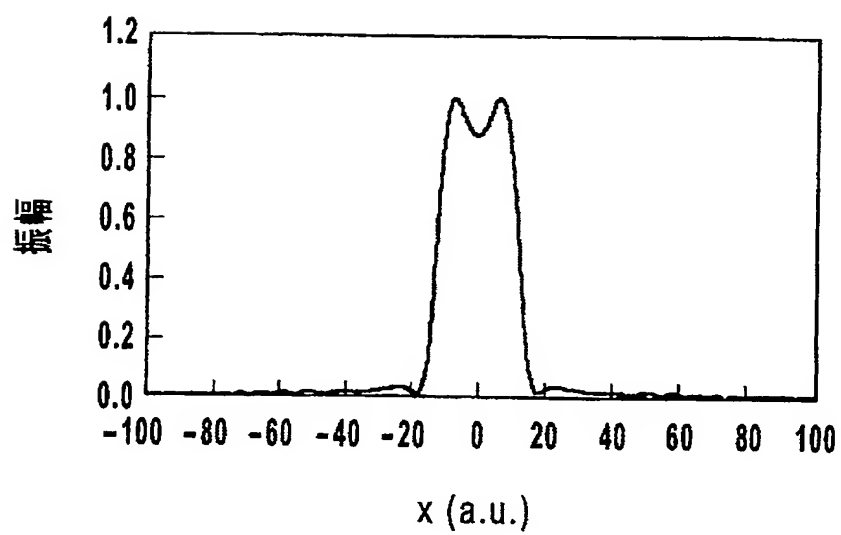


【図 3】

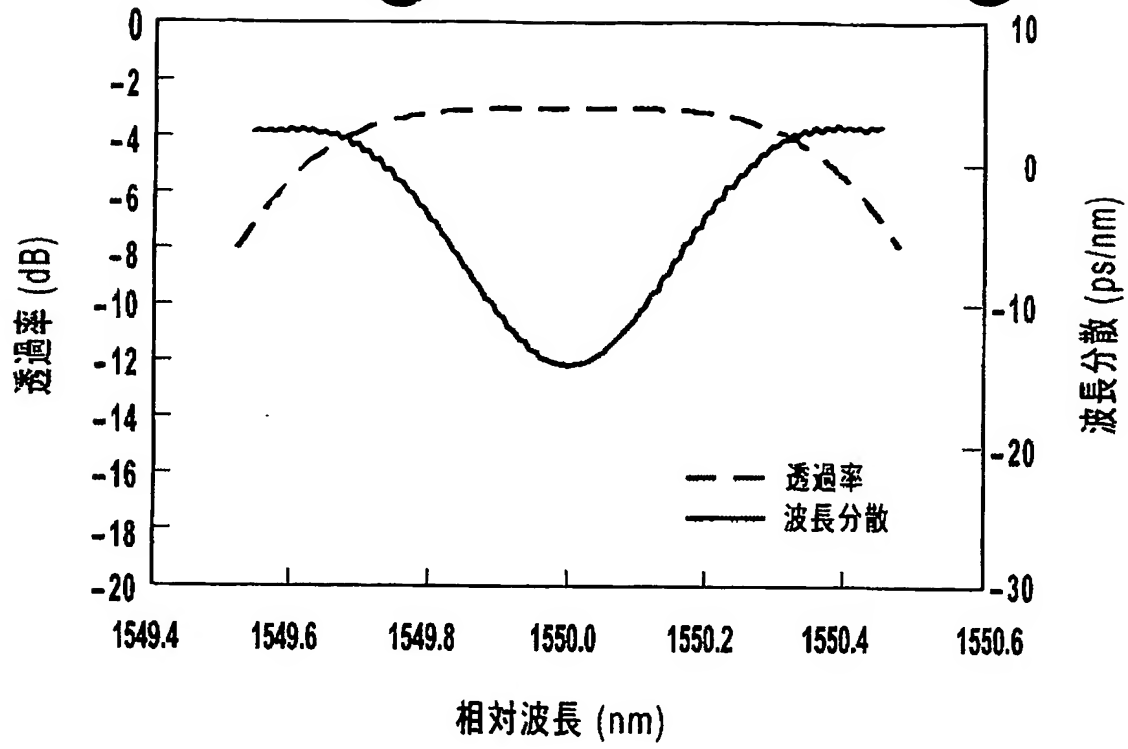
(a)



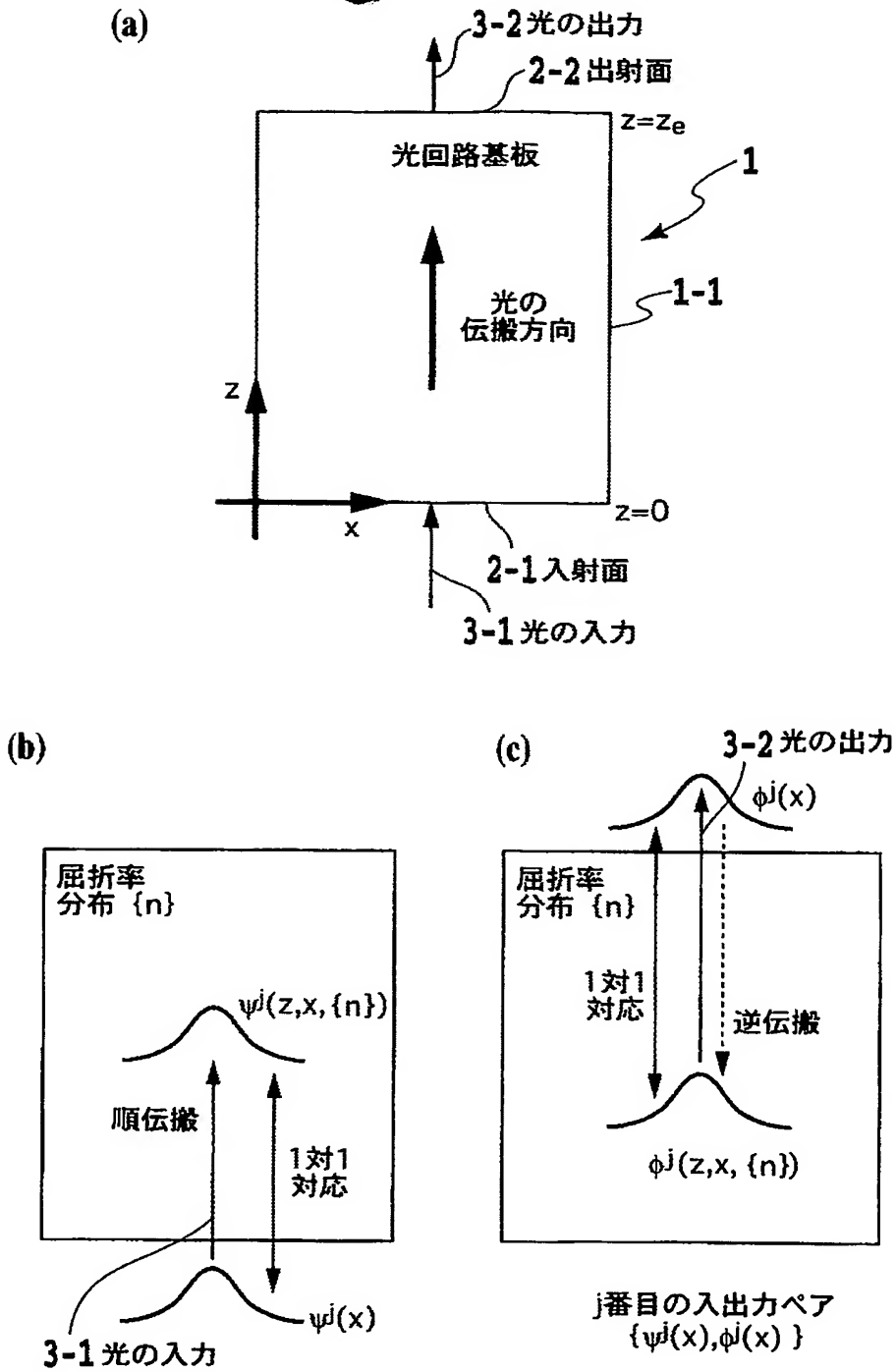
(b)



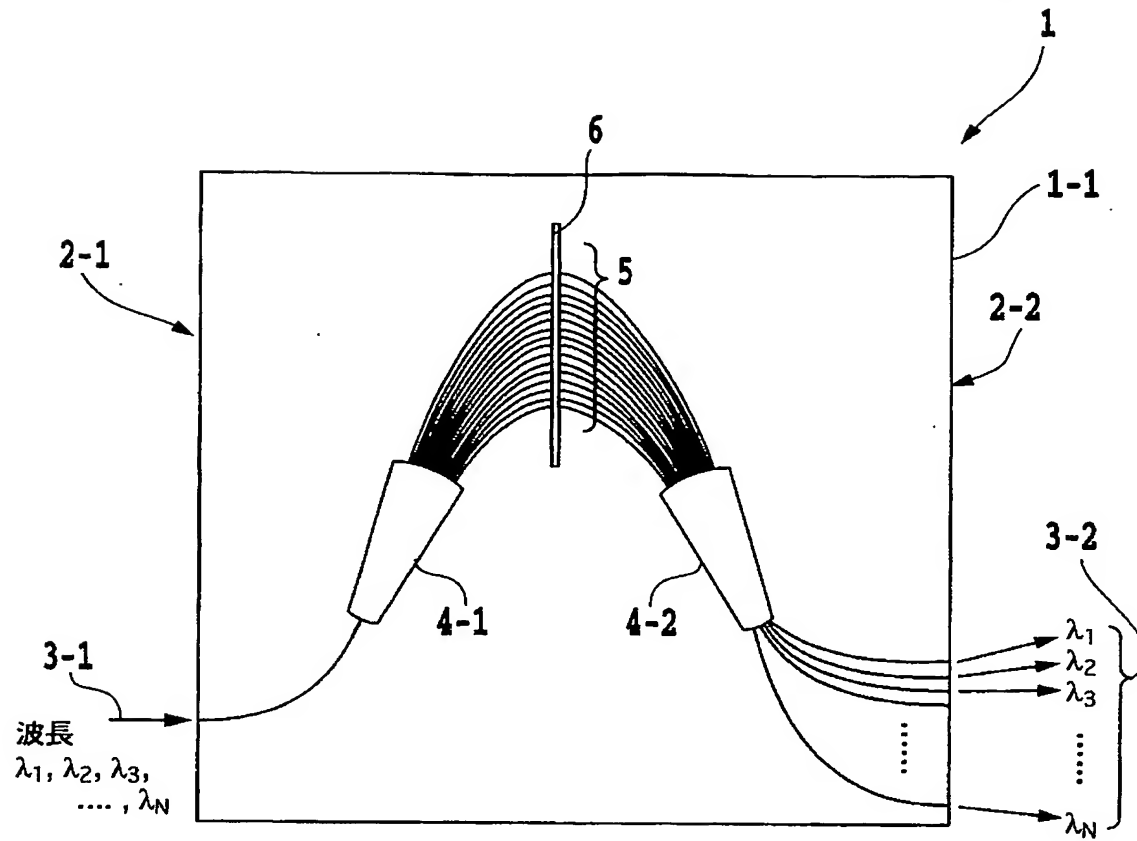
【図 4】



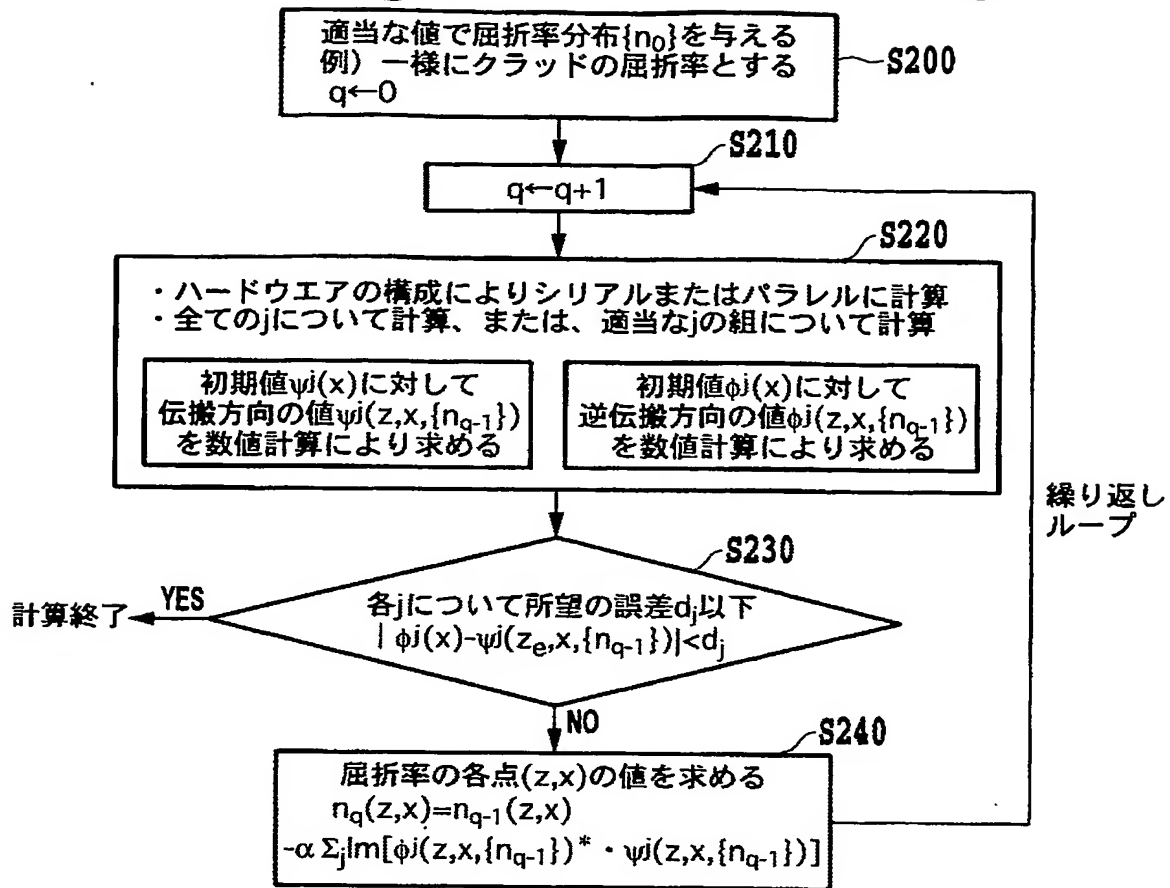
【図 5】



【図 6】



【図 7】

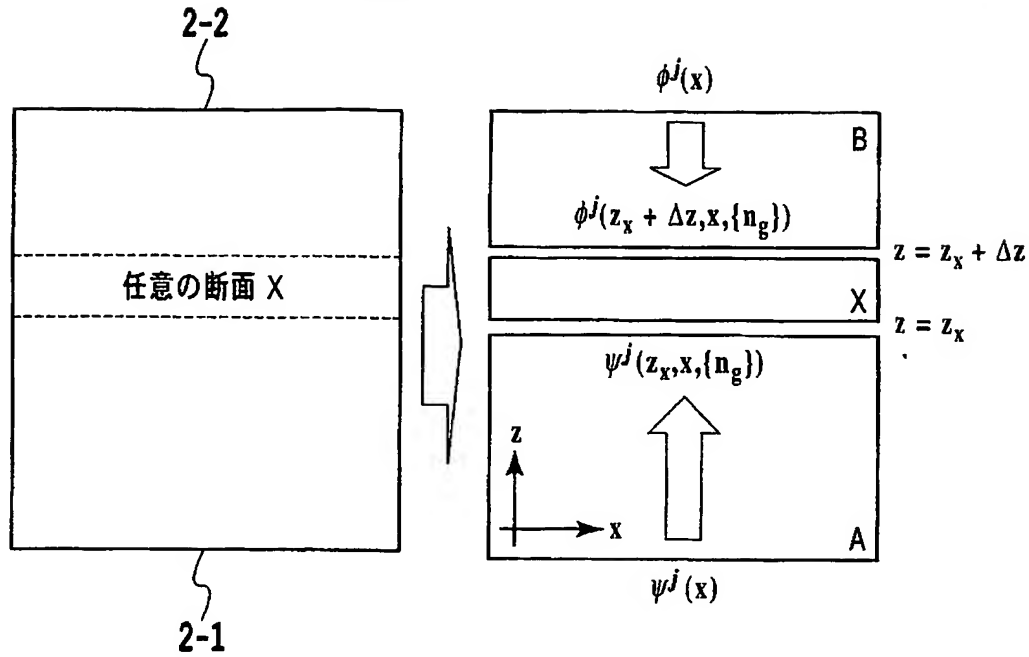


※ “ \leftarrow ” の意味はたとえば

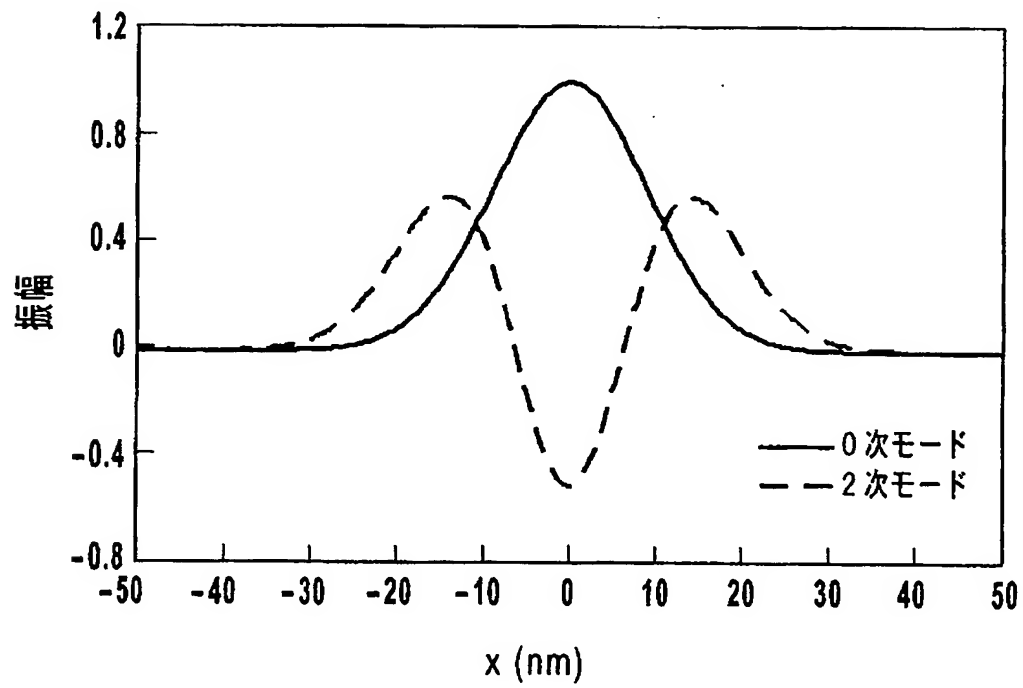
$$A \leftarrow B + C$$

はAにBとCの和を代入することを表す

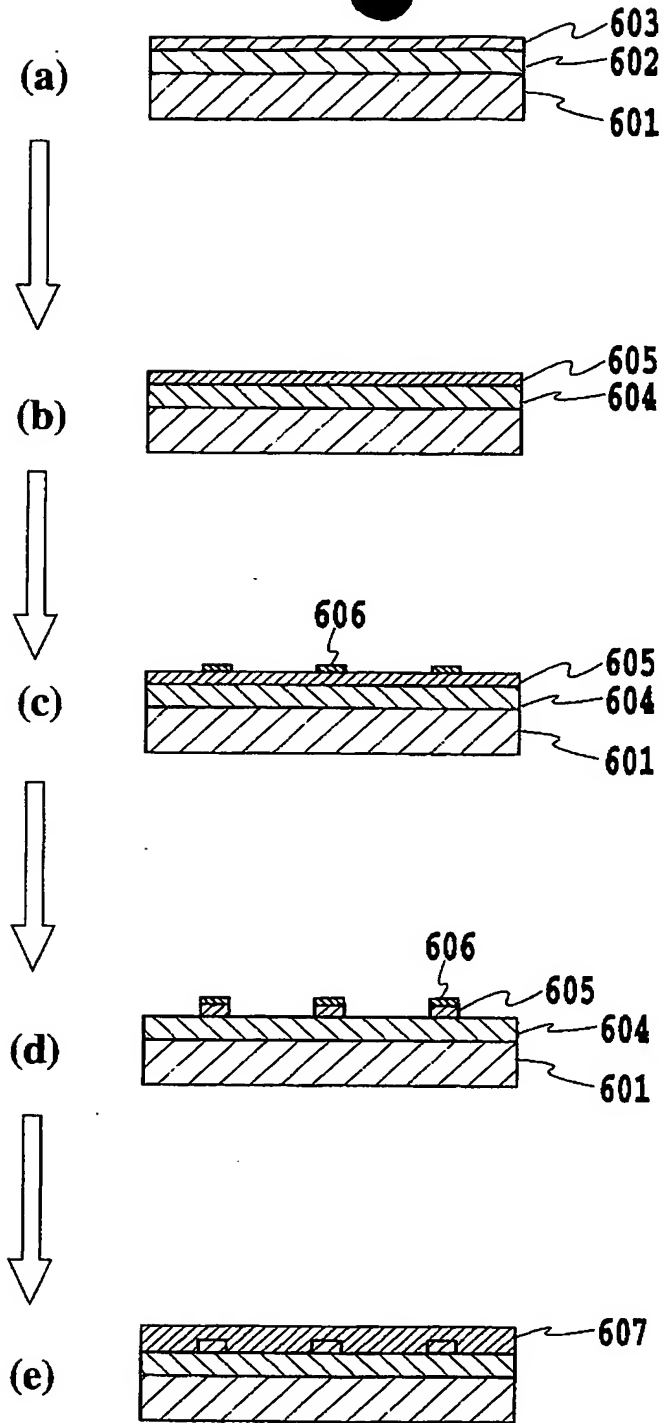
【図 8】



【図 9】



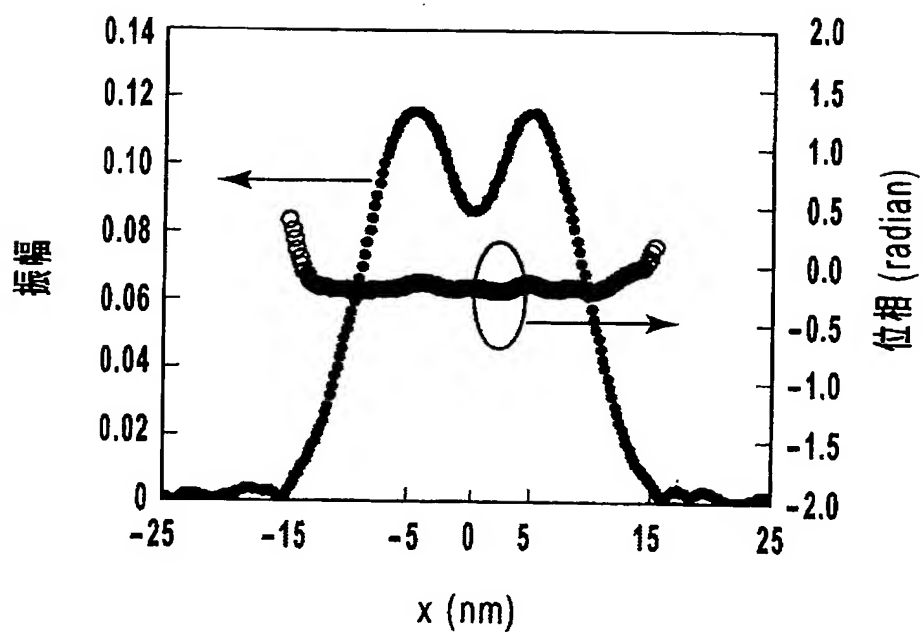
【図 10】



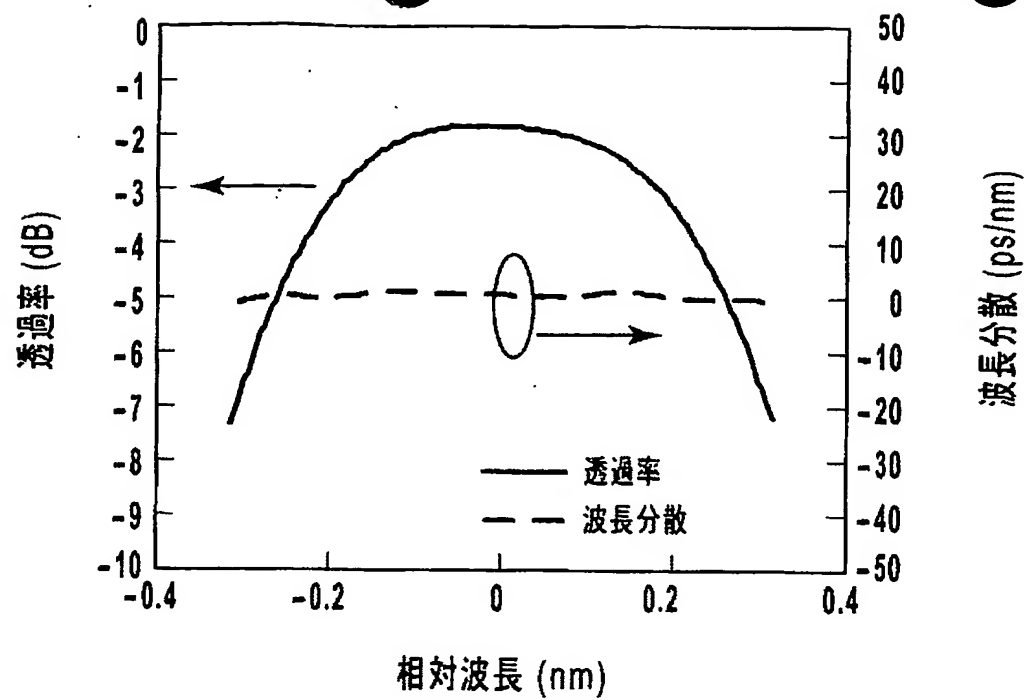
【図 11】



【図 12】



【図 13】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 波長分散の小さなアレイ導波路格子型光合分波回路を提供すること。

【解決手段】 シリコン基板上に、石英系ガラスで形成された入力導波路と第1のスラブ導波路とアレイ導波路と第2のスラブ導波路と出力導波路とが順次接続された回路構成を有し、入力導波路と第1のスラブ導波路との接続領域には、高屈折率を有する散乱点が、光の伝搬方向に伸びる直線に対して概ね線対称となるように2次元的な配置分布で設けられている。この散乱点の1辺の長さは、伝搬光を効果的に散乱させるために $0.2\mu\text{m}$ 以上とすることが好ましい。このような散乱点配置を有する入力導波路から出射される光フィールドの分布（振幅および位相）は、等位相面に歪がなく、かつ、その振幅はダブルピーク（双峰）を有する。

【選択図】 図11

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2003-375986
受付番号	50301831200
書類名	特許願
担当官	第一担当上席 0090
作成日	平成 15 年 11 月 10 日

< 認定情報・付加情報 >

【特許出願人】

【識別番号】	000004226
【住所又は居所】	東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号
【氏名又は名称】	日本電信電話株式会社

【代理人】

申請人

【識別番号】	100077481
【住所又は居所】	東京都港区赤坂 2 丁目 6 番 20 号 谷・阿部特許事務所
【氏名又は名称】	谷 義一

【選任した代理人】

【識別番号】	100088915
【住所又は居所】	東京都港区赤坂 2 丁目 6 番 20 号 谷・阿部特許事務所
【氏名又は名称】	阿部 和夫

特願 2003-375986

出願人履歴情報

識別番号

[000004226]

1. 変更年月日
[変更理由]

住 所
氏 名

1999年 7月15日

住所変更

東京都千代田区大手町二丁目3番1号
日本電信電話株式会社